

사각형 및 원형 출구 Synthetic Jet의 유동 특성에 대한 수치적 연구

Numerical Study on Flow Characteristics of Synthetic Jet
with Rectangular and Circular Slot Exit

김민희^{1*}, 김우례², 김종암²

서울대학교 계산과학 협동과정¹, 서울대학교 기계항공공학부²

초 록

사각형 및 원형 출구 형상 synthetic jet의 수치적 연구를 통하여 유입류가 존재할 경우 평판에서의 유동 구조를 분석하였다. 사각형 출구 형상의 경우, jet 직후에 강한 vortex가 생성되지만 주변에 적은 momentum을 공급하기 때문에 유입류 방향으로 갈수록 유동제어 효과가 급격하게 감소하게 된다. 원형 출구 형상의 경우, 규칙적인 vortex의 형태가 slot 중앙부터 끝까지 나타나고 jet에 의해서 공급되는 vortex의 형태가 유입류의 방향으로 발달되게 되어 보다 멀리까지 vorticity의 영향이 미치게 된다. 유동제어 효과를 예상하기 위하여 사각형 및 원형 출구 형상의 위치 별 wall shear stress를 비교하였다. 그 결과, 원형 출구 형상이 사각형 출구 형상보다 유동제어 효과가 더 클 것으로 예상된다.

ABSTRACT

The flow characteristics of synthetic jet depending on rectangular and circular jet exit configuration are investigated using numerical computation with cross flow. In rectangular slot, synthetic jet generates the strong vortex, however, supply fewer momentum and effectiveness of flow control is reduced along flow direction. In circular slot, regular vortex is formed from slot center to end and developed in flow direction. It affects the wider region than rectangular slot. The distribution of wall shear stress is considered in order to indicate the effectiveness of flow control device for flow separation delay. As a result, circular slot is a more suitable candidate for delaying flow separation.

Key Words : Synthetic jet(Synthetic 제트), Flow control(유동제어), Wall shear stress(전단응력), Flow structure(유동구조)

1. 서 론

유동제어는 고성능, 고효율 항공기 개발에 전제되는 핵심기술이고, 동시에 성능, 안전성 등의 요구를 만족시킴으로써 차세대 항공기의 패러다임의 변화를 앞당길 수 있는 선도적 기술로 평가되고 있다. 이에 유동 박리를 효과적으로 제어하는 것이 항공기의 성능 향상에 직접적인 영향을 미치기 때문에 유동 제어 기법 및 장치에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다. 그 중 능동 유동 제어 기법 중 하나인 synthetic jet에 대한 연구가 최

근 활발하게 수행되고 있다.

Smith⁽¹⁾, Zaman and Milanovic⁽²⁾, C.Kim⁽³⁾ 등은 유입류가 있을 경우 경계층과 synthetic jet의 유동구조간의 상관관계에 대한 실험적 연구를 수행하였다. F.M. Najjar⁽⁴⁾ 등은 DNS를 이용하여 synthetic jet 내부의 cavity 유동과 외부 경계층과의 유동을 모사하였고, 사각형 출구 형상의 가로세로비 변화에 대한 연구를 수행하였다⁽³⁾. 또한 R.K. Agarwal⁽⁵⁾은 다양한 난류 모델을 이용하여 단일 원형 출구에 대한 속도 분포를 파악하였다. S. Zhong⁽⁶⁾은 단일 원형 출구 synthetic jet의

유동 구조를 파악하고 경계층 내의 상관관계에 대해서 수치적, 실험적으로 조사하였다.

본 연구에서는 수치 해석을 통하여 유입류가 있을 경우 synthetic jet의 출구 형태에 따른 유동 구조를 파악하고 이를 통하여 유동제어 성능을 파악하고자 한다.

2. 본 론

2.1 지배방정식 및 수치기법

본 연구에서는 3차원 비정상 비압축성 Reynolds-Averaged Navier-Stokes 방정식을 이용하였으며, 비압축성 유동 해석을 위하여 pseudo compressibility 방법을 적용하였다. 비정상 유동장을 해석하기 위하여 이중시간 전진법을 사용하였으며 비점성항은 flux difference splitting 방법에 기초한 풍상차분법을, 점성항은 중앙 차분하였다. 또한 MUSCL을 이용하여 고차 정확도로 계산 하였다. 난류 유동장 해석을 위해서 k- ω SST 난류 모델을 사용하였으며 난류 천이 과정에서의 유동을 조사하기 위하여 Total stress limitation(TSL)을 사용하였다. 시간 전진은 내재적 시간 적분법인 LU-SGS 방법을 사용하였다. 계산에 사용된 코드는 in-house 코드로 충분히 검증되었다^(3,7,8,9).

2.2 Synthetic jet actuator 출구 형상 및 경계 조건

Synthetic jet 출구 형태는 Fig 1과 같으며 각각의 출구 형상의 출구 면적과 slot의 길이는 동일하다. 좌표는 Fig 2와 같이 유입류 방향이 x-방향, slot의 centerline을 중심으로 slot 방향이 y-방향, xy평면에 수직인 방향이 z-방향이다. 해석 영역은 half-plane으로 하였으며, 유동 해석 조건은 참고 문헌 (3)과 동일하게 하였다. 격자는 사각형 출구 형상의 경우 800만개, 원형 출구 형상의 경우 1300만개 이며, slot diameter 기준으로 x,y,z 방향으로 각각 170배, 150배, 150배 확장하여 격자를 구성하였다.

Synthetic jet은 orifice를 통하여 외부의 공기를 흡입하고 그 유체를 그대로 분출하는 방식으로 외부로 부터의 질량공급 없이 유동을 제어한다. Synthetic jet actuator를 모델링하기 위해서

흡입/분출 형태의 경계조건을 사용하였으며, Jet의 속도 크기는 다음과 같다⁽¹⁰⁾.

$$u_{jet}(\xi, \eta = 0, t) = A_j f(\eta) \sin(\omega t) \quad (1)$$

여기서 ξ 는 synthetic jet의 속도 방향을 나타내고, η 는 그 방향에 수직 방향을 나타낸다. $f(\eta)$ 는 jet 출구에서의 속도 분포를 나타내는 함수로 L. Kral 등의 연구에 의하여 제안된 top-hat 형태($f(\eta)=1$)의 속도 분포를 사용하였으며, 이 모델은 jet 운동량이 난류 소산으로 외부 유동장에 전달되는 물리현상을 포함하고 있으므로 synthetic jet의 유동 제어 경향성을 파악하는데 적절하다고 판단된다.

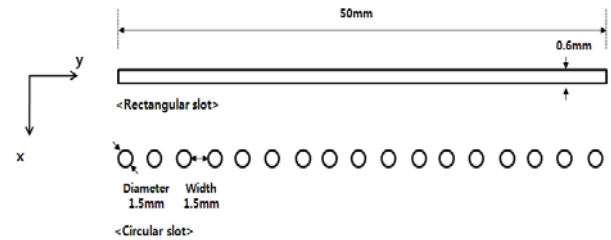


Fig 1. Synthetic jet 출구 형태

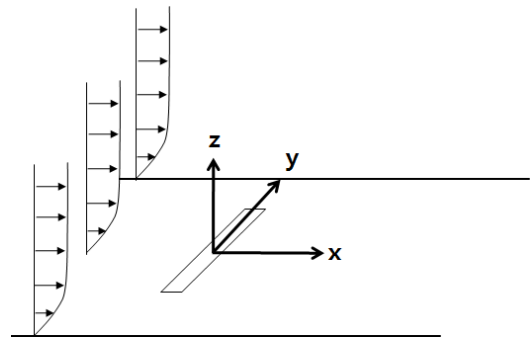


Fig 2. 좌표계

2.3 코드 검증

유입류 조건은 실험값에서 구한 경계층 두께를 이용하여 power law of incompressible turbulent mean flow의 velocity profile을 적용하였다. Fig 3은 동일한 위치에서 유입류 조건과 실험값을 비교한 결과이다. 실험 측정 위치는 x=45, 90, 120mm이며, 유입류 방향으로 slot의 중심 부분에서 측정한 값이다. 사각형 및 원형 출구 형상에 대해서 실험값과 비교한 결과 Fig 4,5에서와 같이 유사하게 일치하는 것을 알 수 있다.

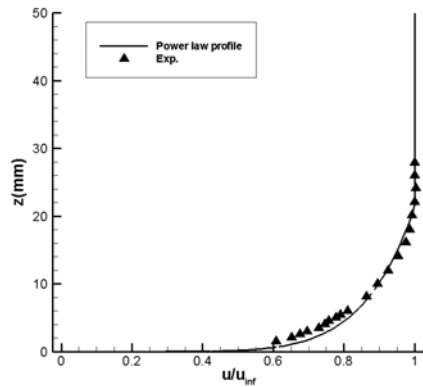


Fig 3. 유입류 조건

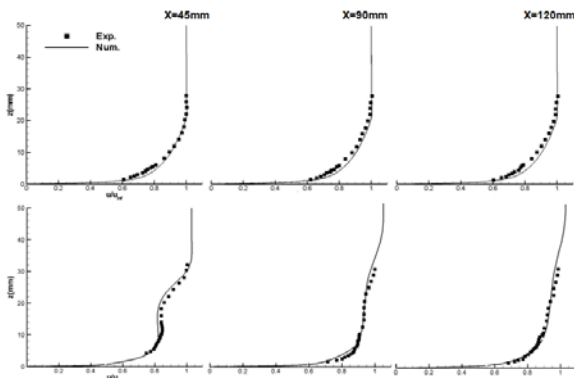


Fig 4. 사각형 출구 형상의 속도 분포
(위: control off, 아래: control on)

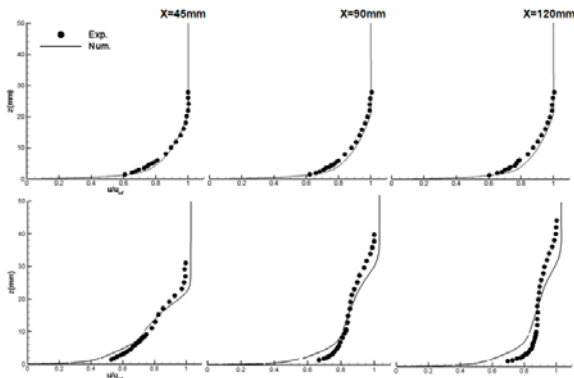


Fig 5. 원형 출구 형상의 속도 분포
(위: control off, 아래: control on)

2.4 사각형 및 원형 출구 형상 유동 구조 분석

2.4.1 Phase average iso-surface vorticity

Fig 6, 7은 사각형 및 원형 출구 형상의 x방향 phase average iso-surface vorticity를 나타낸 것이다. jet이 발생하는 위치는 $y=0-25\text{mm}$ 까지이다. Jet이 발생하는 위치에서 컨투어를 비교해보면 원형 출구 형상이 사각형 출구 형상보다 더 큰 vortex를 균일하게 형성하는 것을 확인할 수 있

다. 사각형 출구 형상의 경우, slot 끝단에서만 vorticity가 크게 나타나게 되고 유동이 유입류 방향으로 진행될수록 바닥면에 jet vortex가 커지게 된다. 또한 이는 유입류의 방향으로 진행될수록 slot 중앙으로 퍼지는 것을 확인할 수 있다. 원형 출구 형상의 경우, jet 이 위치해 있는 영역 뿐만 아니라 유입류 방향으로 이동하더라도 jet에 의한 vortex 강도가 균일하게 된다. 원형 출구 형상의 경우에도 끝단에서 유동이 말리는 현상이 발생하기는 하지만 그 정도가 크지 않기 때문에 slot 끝단에서 발생하는 jet vortex의 크기 감소가 적게 된다. 또한 각각의 x위치에 상관없이 상대적으로 균일한 jet vortex를 갖는다.

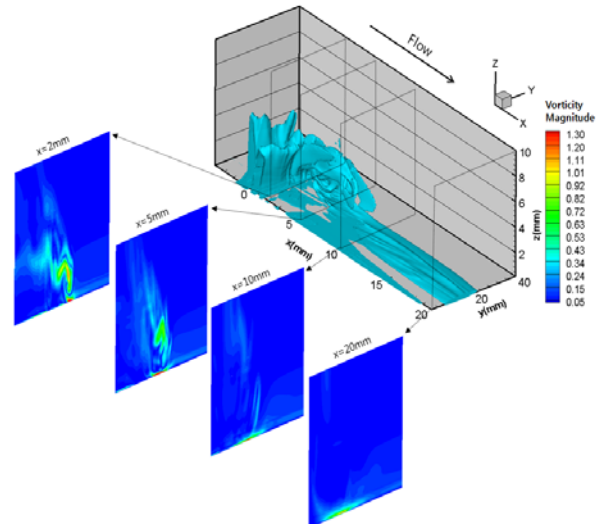


Fig 6. 사각형 출구 형상의 x-방향 유동 구조

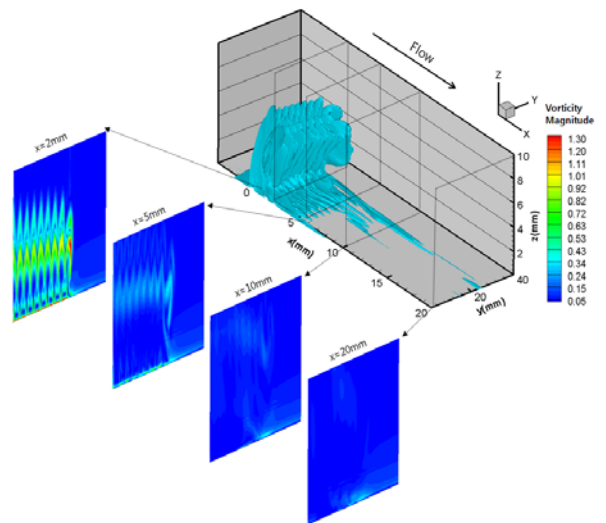


Fig 7. 원형 출구 형상의 x-방향 유동 구조

2.4.2 사각형 출구 형상의 유동구조 분석

Fig 8는 synthetic jet phase의 변화에 따른 iso-vorticity 유동장이다. 사각형 출구 형상의 blowing phase를 보면, 끝단의 강한 jet vortex에 의해서 반시계 방향으로 회전하는 유동이 발생하게 됨을 알 수 있다. 또한 jet 직후에 강한 vortex가 발생하기 때문에 이로 인하여 유동이 섞이는 효과가 발생하게 된다. 이에 jet 직후에 유동제어 효과가 클 것으로 판단된다. 또한 jet에 의한 vortex가 크게 생성되기는 하지만 주변에 공급되는 momentum이 적어지게 되어 유입류 방향으로 갈수록 유동제어 효과가 급격하게 감소할 것으로 예상된다.

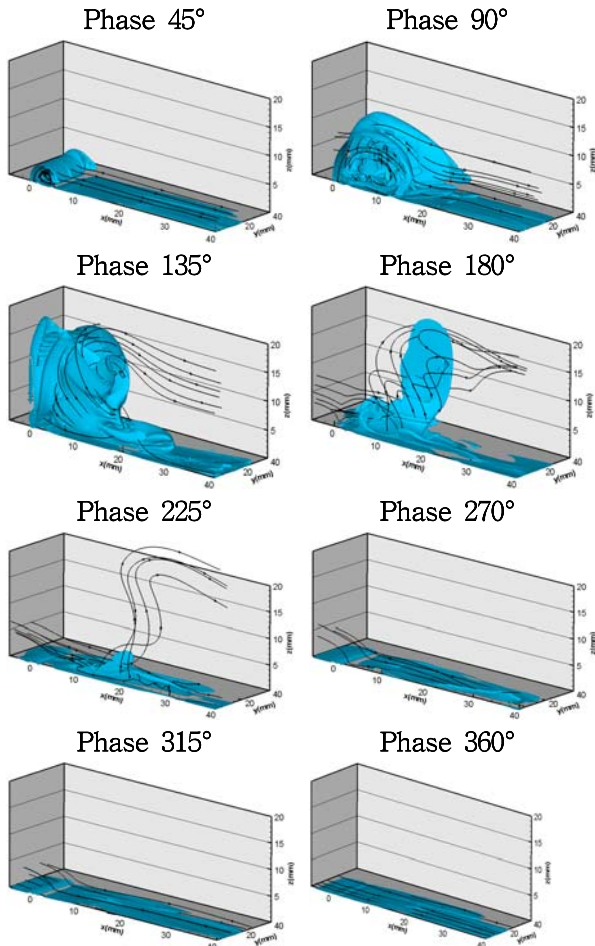


Fig 8. Phase에 따른 사각형 출구 형상의 유동 구조

2.4.3 원형 출구 형상의 유동구조 분석

Fig 9는 사각형 출구 형상과 동일한 방법으로 나타낸 원형 출구 형상의 유동장이다. 사각형 출

구 형상과 비교해보면, 사각형 출구는 slot 끝단으로 갈수록 jet에 의해서 vortex가 크게 나타나는 반면, 원형 출구 형상은 규칙인 vortex의 형태가 slot 중앙에서 끝까지 나타나게 된다. 이는 phase averaged contour에서도 동일하게 나타난 것을 확인할 수 있다. 또한, jet에 의해서 공급되는 vortex가 유입류 방향으로 말리는 형태가 아니라 x방향으로 발달되게 되어 jet slot에서 보다면 거리까지 jet에 의해 발생하는 vorticity의 영향이 미칠 것으로 생각된다. Phase 135°를 보면, jet interaction에 의해서 반시계 방향으로 발생하는 유동이 나타나기는 하지만 그 크기가 작기 때문에 상대적으로 주변에 공급되는 momentum이 크게 되어 유동제어 효과가 더 클 것으로 예상된다.

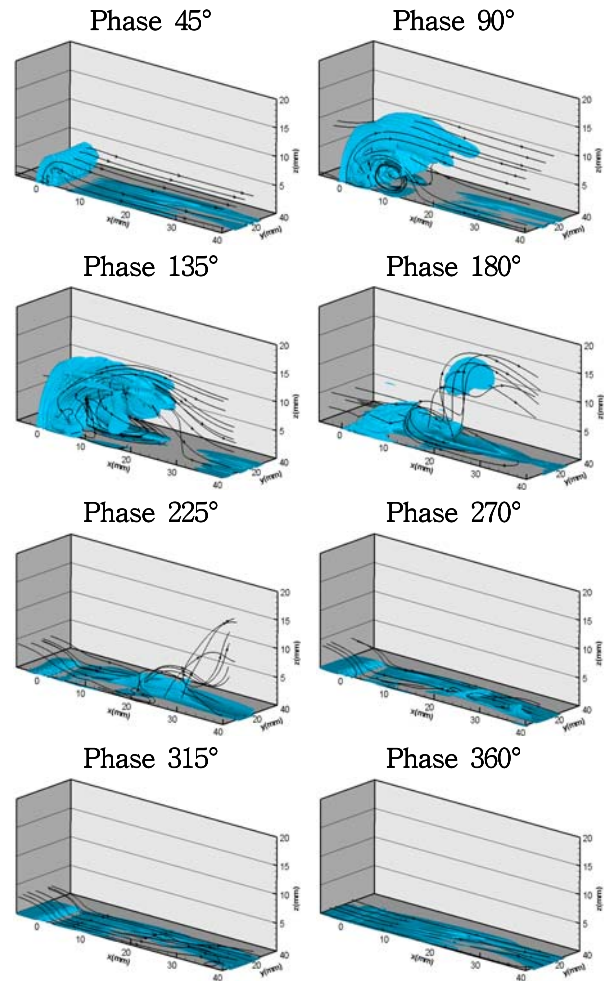


Fig 9. Phase에 따른 원형 출구 형상의 유동 구조

2.5 사각형 및 원형 출구 형상의 유동제어 성능 파악

Wall shear stress는 friction drag와 밀접한 관계가 있는 값이다. 또한 박리 지연은 skin friction의 증가를 의미하므로 유동박리 현상은 wall의 skin friction의 증가에 의해서 지연될 수 있게 된다. 이에 wall shear stress가 유동제어의 효과를 나타낼 수 있는 지표가 될 수 있다고 판단된다. Fig 10는 x방향 위치에 따른 사각형 및 원형 출구 형상의 wall shear stress distribution (WSSD)를 정량적으로 비교한 것이다. 유동제어를 하지 않았을 경우의 wall shear stress($\tau_{w_{ref}}$)로 나누어 synthetic jet이 유동장에 미치는 영향만을 살펴보았다. 이때 y는 0~40mm까지이다. 유입류 방향으로 진행될수록 원형 출구 형상이 더 큰 유동제어 효과를 가짐을 확인할 수 있다. x=50~200mm 사이에서의 값을 비교해보면 약 15~18% 더 크게 나타나게 된다. Fig 12, 13은 x방향 위치에 따른 WSSD이다. 레이놀즈수가 동일할 경우, WSSD의 감소폭이 작을수록 유동제어 효과가 크게 된다⁽⁶⁾. x=5mm와 x=200mm를 비교해보면, WSSD의 감소율은 사각형 출구 형상의 경우 83%, 원형 출구 형상의 경우 54%이다. 이에 reynolds수가 동일하고, jet momentum이 slot의 형태에 상관없이 일정할 경우, 원형 출구 형상이 박리 지연 효과가 더 크게 발생할 가능성이 있음을 나타낸다.

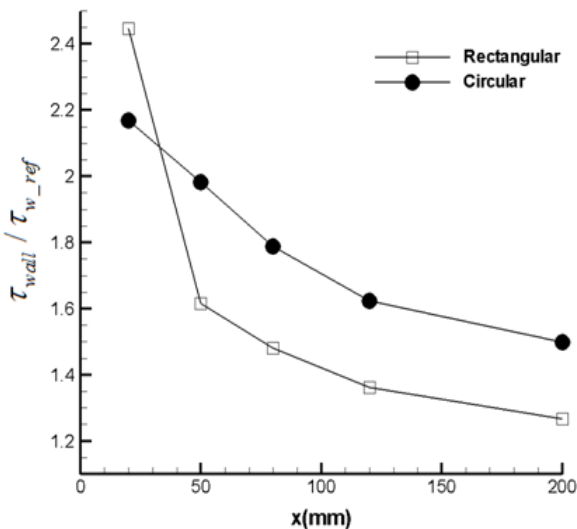


Fig 10. 사각형 및 원형 출구 형상의 x위치에 따른 WSSD

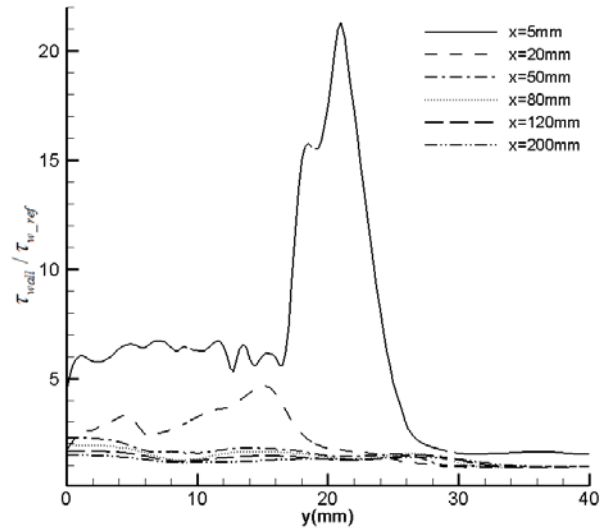


Fig 11. 사각형 출구 형상의 WSSD

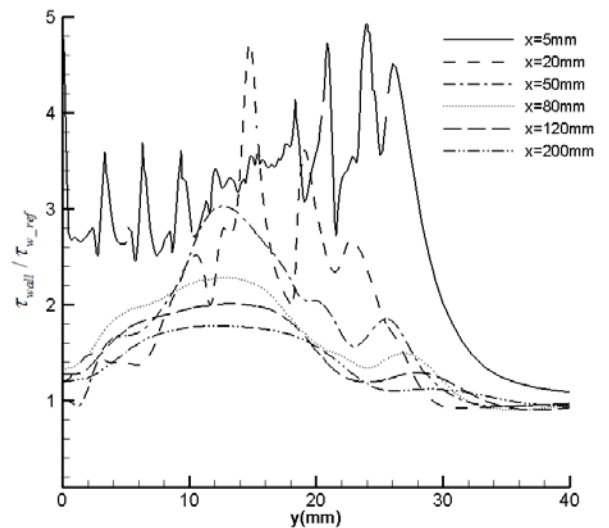


Fig 12. 원형 출구 형상의 WSSD

3. 결 론

Synthetic jet의 출구 형상에 따른 유동 구조 분석 및 유동제어 효과를 알아보기 위하여 사각형과 원형 출구 형상에 대하여 수치적 연구를 수행하였다. 사각형 출구 형상의 경우, jet 직후에 강하게 vortex가 생성되며 이는 jet interaction에 의해 반시계 방향으로 회전하는 유동을 발생시키며 이로 인하여 jet 직후에 유동제어 효과가 클 것으로 판단된다. 하지만, jet에 의한 vortex가 크게 생성되어 주변에 공급되는 momentum이 적어지기 때문에 유입류 방향으로 갈수록 유동제어 효과가 급격하게 감소하게 된다. 원형 출구 형상

의 경우, 규칙적인 vortex가 slot 중앙부터 끝까지 나타나고 jet에 의해서 공급되는 vortex의 형태가 유입류의 방향으로 발달되게 되어 jet slot에서 보다 먼 거리까지 jet에 의해 발생하는 vorticity의 영향이 미치게 된다. 유동제어 효과를 예상하기 위하여 사각형 및 원형 출구 형상의 위치별 wall shear stress을 비교하였다. 그 결과, 원형 출구 형상이 사각형 출구 형상보다 약 15~18%가 더 높게 나타났다. 따라서 사각형 및 원형 출구 형상의 유동구조 분석 및 유동제어 효과를 살펴본 결과 사각형 출구 형상보다 원형 출구 형상이 유동제어 효과가 더 클 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원(UC100031JD), 슈퍼컴퓨팅센터(KSC-2010-C1-0030), 항공 우주 신기술 연구소의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Smith, D. R., "Interaction of a Synthetic Jet with a Crossflow Boundary Layer," AIAA Journal, Vol. 40, No. 11, 2002, pp. 2277-2288.
- (2) Zaman, K. B. M. Q., and Milanovic, I. M., "Synthetic Jets in Cross-Flow. Part I: Round Jet," AIAA Paper 2003-3714, June 2003.
- (3) W. Kim., S. Kim., K. Choi, C. Kim, "Experimental and Computational Study on Flow Characteristics by Synthetic Jets Configuration", 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, AIAA 2010-864, Orlando, Florida, 4-7 January 2010.
- (4) B.R.Ravi, R. Mittal, F.M. Najjar, "Study of Three-Dimensional Synthetic Jet Flowfields Using Direct Numerical Simulation", 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, 5-8 January 2004.
- (5) J. Cui, R. Agarwal, "3-D CFD Validation of an Axisymmetric Jet in Cross-Flow (NASA Langley Workshop Validation: Case 2)", 43rd AIAA Aerospace Sciences

Meeting, Reno, Nevada, 2005.

- (6) J. Zhou, S. Zhong, "Coherent structures produced by the interaction between synthetic jets and a laminar boundary and their surface shear stress patterns", Computers & Fluids, Volume 39, Issue 8, September 2010, pp. 1296-1313.
- (7) S. H. Kim, C. Kim, "Separation Control on NACA23012 using Synthetic Jet", Aerospace Science and Technology, 2008.
- (8) 김민희, 김상훈, 김우례, 김종암, 김유신, "Synthetic jet을 이용한 스마트 무인기 유동제어 Part 1 : 정지 비행 모드에서 synthetic jet을 이용한 유동제어", 한국항공우주학회지, Vol37, pp1173-1183, 2009.
- (9) 김민희, 김상훈, 김우례, 김종암, 김유신, "Synthetic jet을 이용한 스마트 무인기 유동제어 Part 2 : 천이 비행 모드에서 synthetic jet을 이용한 유동제어", 한국항공우주학회지, Vol37, pp1184-1191, 2009.
- (10) L. D. Kral, J. F. Donovan, A. B. Cain and A. W. Cary, "Numerical Simulation of Synthetic Jet Actuators", AIAA paper, pp1824, 1997.